DYNAMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE EN SOLS CULTIVÉS SOUS CLIMATS TEMPÉRÉS

par **F. Jacquin**

RÉSUMÉ

Après avoir rappelé les trois voies classiques de l'humification, nous avons étudié les variations quantitatives et qualitatives de la matière organique en sols cultivés. Nous notons une complémentarité entre humine microbienne et humine de polycondensation concernant les mécanismes d'édification de la structure ; les produits transitoires et éphémères agissent sur la formation des agrégats et les acides humiques polycondensés maintiennent la stabilité structurale. D'autre part, les rythmes de minéralisation des composés azotés, surtout ceux inclus dans la biomasse microbienne interviendront de plus en plus en agriculture intensive lorsque les conditions pédoclimatiques provoqueront une modification des objectifs prévisionnels de rendements.

SUMMARY

DYNAMICS OF ORGANIC MATTER IN CULTIVATED SOILS OF TEMPERATE AREAS

Researches conducted in collaboration with Professor Ph. Duchaufour contribued to put forward the existence of three main humification pathways: inheritance with formation of residual humin, polycondensation producing compounds of increasing molecular weights and leading to insolubilized humin, through a decrease in the amount of reactive groups; neosynthesis of humin, which corresponds to microbial biomass.

In cultivated soils, the idea of a quantitative balance-sheet must be taken into account. Regarding the mechanisms of structure stabilization, a complementarity between microbial and insolubilized humins is noticed: transient products are involved in the formation of aggregates, polycondensed humic acids maintain the structural stability.

Additionnally, the mineralization rhythms of nitrogen compounds, especially those included in the microbial biomass, are increasingly important in intensive agriculture: pedoclimatic conditions may modify the yield forecasts, as well as the anticipated balance-sheet of nitrogen fertilizers. In the case of a high microbial reorganization, back effects of the fertilizer may occur, and either distribute the positive action of the fertilizer on the following cultures, or induce ecological hazards, through nitrate migrations.

These findings led us to establish a specific classification of humus of cultivated soils, based on the different kinetics of humification processes, and on the mineralization rhythms of organic matter.

L'évolution des composés organiques dans les différents écosystèmes naturels, et plus particulièrement sous couvert forestier, a donné lieu à de nombreuses études ; une brillante synthèse remise périodiquement à jour par Duchaufour (1970-1983) permet de comprendre l'influence de cette matière

C.R. Acad. Agri. de France, 1985, 71, n° 6, pp. 635-642, Séance du 5 juin 1985.

organique sur les mécanismes régissant les diverses pédogenèses. Dans les agrosystèmes intensifs, les perturbations liées d'une part à des techniques culturales de plus en plus nombreuses et à des flux de restitution de plus en plus modifiés, entraînent des cinétiques d'évolution très différentes.

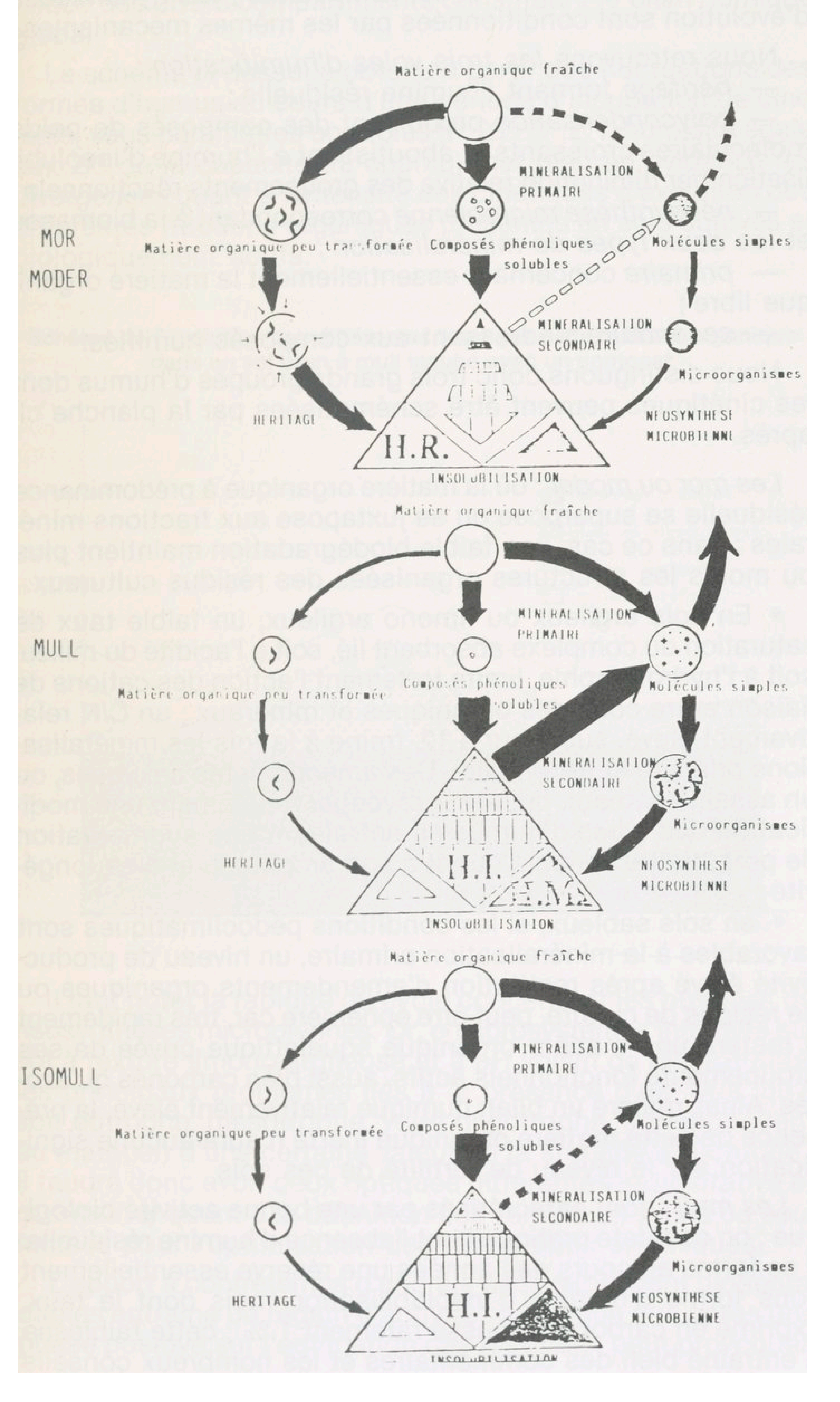
Dès 1949, Hénin et Turc avaient mis au point une technique de séparation entre matières organiques libres et fractions humifiées ; les premiers matériaux présentant une structure biochimique proche des résidus de récoltes fournissent, par biodégradation, des composés transitoires jouant un rôle important sur l'édification des agrégats. La matière organique liée aux fractions minérales résulte traditionnellement d'un processus de polycondensation de composés aromatiques et aliphatiques. Nous avons présenté antérieurement (Jacquin 1963, Gallali 1980) une participation à l'étude de l'édifice structural des divers composés humiques décrits par (Kononova 1958, Flaig 1970) (Schnitzer et Khan 1978). Nous apportons ici quelques précisions concernant l'évolution de la matière organique des sols cultivés.

Dans les sols calcimagnésiques, nous avons mis en évidence (Jacquin, Le Tacon 1970) la part prépondérante des composés non extractibles entraînant une valeur élevée du bilan humique : *nous avons alors dénommé cette fraction humine résiduelle ou héritée.* En effet, ces composés organiques présentaient une structure biochimique proche des résidus culturaux. Des investigations supplémentaires (Jacquin *et al.* 1980) ont démontré la formation d'une gangue de carbonate de calcium protégeant cette forme d'humine d'une biodégradation ultérieure. De ce fait, on constate dans les rendzines cultivées une accumulation d'humus supérieure à celle rencontrée dans des sols à faibles activités biologiques tels les sols podzoliques.

Au cours d'études concernant l'édification de la stabilité structurale en sol brun lessivé à texture limono-argileuse et après adjonction des substrats organiques facilement biodégradables (Nussbaumer *et al.* 1970), *il a été possible de mettre en évidence le rôle primordial des composés humiques de néosynthèses microbiennes.*

L'ensemble de ces recherches et surtout leurs applications agronomiques concernant la maintenance ou l'amélioration du niveau de fertilité des sols cultivés nous ont conduits à établir une classification des humus agricoles (Jacquin et Caraballas, 1979). Nous avons conservé les termes s'appliquant aux écosystèmes naturels car, malgré des modifications

Évolution de la matière en sols cultivés sous climats tempérés



profondes de structure et de composition, les dynamiques d'évolution sont conditionnées par les mêmes mécanismes.

Nous retrouvons *les trois voies d'humification :*

— *héritage* formant l'humine résiduelle ;

— *polycondensation* produisant des composés de poids moléculaires croissants et aboutissant à l'humine d'insolubilisation par diminution relative des groupements réactionnels ;

— *néosynthèse microbienne* correspondant à la biomasse et les *deux types de minéralisation ;*

— *primaire* concernant essentiellement la matière organique libre ;

— *secondaire* s'adressant aux composés humifiés.

Nous distinguons donc trois grands groupes d'humus dont les cinétiques peuvent être schématisées par la planche ci-après.

Les mor ou moder : où la matière organique à prédominance résiduelle se superpose ou se juxtapose aux fractions minérales ; dans ce cas, une faible biodégradation maintient plus ou moins les structures organisées des résidus culturaux.

• En sols argileux ou limono argileux, un faible taux de saturation du complexe absorbant lié, soit à l'acidité du milieu, soit à l'hydromorphie, limite fortement l'action des cations de liaison entre colloïdes organiques et minéraux ; un C/N relativement élevé, supérieur à 12, freine à la fois les minéralisations primaire et secondaire. Des amendements calciques, ou un assainissement, peuvent provoquer rapidement une modification des types d'humus en entraînant une augmentation de potentialité variable quant à son amplitude et à sa longévité :

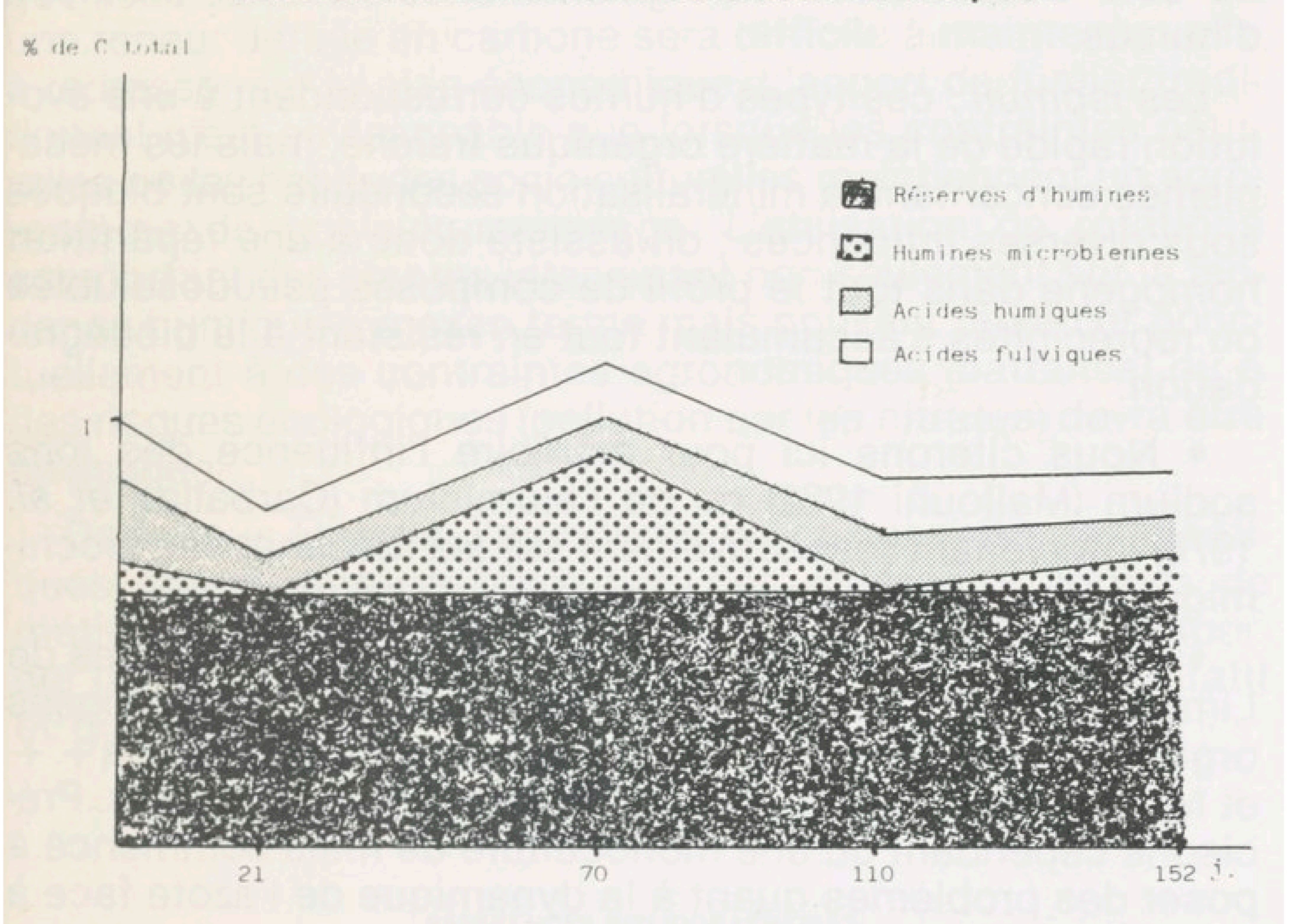
• en sols sableux, si les conditions pédoclimatiques sont favorables à la minéralisation primaire, un niveau de productivité élevé après restitution d'amendements organiques ou de résidus de culture, peut-être éphémère car, très rapidement il restera une matière organique squelettique privée de ses groupements fonctionnels actifs, aussi bien carbonés qu'azotés. Ainsi, malgré un bilan humique relativement élevé, la présence de cette matière organique inerte n'aura aucune signification sur le niveau de fertilité de ces sols.

Les mull : sont caractérisés par une bonne activité biologique ; on constate pratiquement l'absence d'humine résiduelle. Il se forme au cours des années une réserve essentiellement sous forme d'humine d'insolubilisation mais dont le taux, exprimé en carbone, dépasse rarement 1 % ; cette faiblesse a entraîné bien des commentaires et les nombreux conseils

agronomiques doivent être interprétés à la lumière de la dynamique des divers compartiments constituant le bilan humique global.

Le schéma ci-dessous obtenu à partir des fluctuations des formes d'humus au cours d'une période d'incubation de cinq mois, sous paramètres contrôlés (t° 28° C ± 1, humidité égale aux 2/3 de la capacité au champ) met bien en évidence les divergences quant à l'intensité des cinétiques d'évolution des différentes fractions organiques présentes en sols cultivés et biologiquement actifs.

Schéma de l'évolution des différentes fractions de la matière organique dans un sol brun à mull incubé avec un compost



Il faut noter la rapidité du cycle concernant les humines de néosynthèses microbiennes. Or, en agrosystèmes intensifs sur sol à texture limono-argileuse et à pH voisin de la neutralité, les principaux problèmes liés à la présence d'un *mull,* qu'il soit eutrophe, mésotrophe, voire oligotrophe, correspondent au maintien d'une certaine valeur de la stabilité structurale ; il faudra donc avoir deux optiques différentes *(quantitative et qualitative)* quant à la définition des valeurs critiques ou souhaitées pour l'optimisation des restitutions organiques.

L'apport à contretemps d'engrais verts facilement biodégradables entraîne un regain d'activité biologique qui, après une phase positive sur l'édification des agrégats, peut provoquer,

suivant les conditions climatiques, un effet néfaste sur le maintien de la stabilité structurale.

A long terme, la lutte contre l'érosion des sols agricoles nécessitera la présence d'un minimum de composés humiques réactionnels par l'intermédiaire de leurs groupements carboxyliques ; en effet, ceux-ci, en présence d'ions bivalents, maintiendront un certain taux d'agrégation.

Nous voyons donc là une limite au raisonnement mathématique permettant d'appliquer sur le terrain des modèles mettant en œuvre des paramètres variables et à effets aléatoires. L'agronome devra raisonner mais prendre des risques économiques et écologiques s'il veut maintenir dans ces types de sols des cultures industrielles fortes consommatrices d'humus.

Les isomull : ces types d'humus correspondent à une évolution rapide de la matière organique fraîche, mais les mécanismes concernant la minéralisation secondaire sont bloqués sous diverses influences ; on assiste donc à une répartition homogène dans tout le profil de composés pseudosolubles ou reprécipités s'accumulant tout en résistant à la biodégradation.

• Nous citerons ici pour mémoire l'influence des ions sodium (Mallouhi 1982) ou de l'aluminium (Carballas *et al.* 1978) intervenant respectivement sur les mécanismes biochimiques des sols salés ou humifères d'altitude.

• Nous effleurerons le cas des sols noirs isohumiques de Limagne où une maturation pédoclimatique des composés organiques a donné, en présence d'argiles riches en Ca^{++} et Mg^{++}, des humus voisins de ceux des tchernozems. Précisons cependant qu'une monoculture de maïs commence à poser des problèmes quant à la dynamique de l'azote face à la restitution des résidus culturaux.

• Dans les rendzines ou sols assimilés, le complexe absorbant saturé en Ca^{++} provoque un degré de polymérisation des composés humifiés plus faible que dans les sols podzoliques (rapport AF/AH $\geqslant 3$) ; ceci lié à la précipitation de fulvates de calcium. Un deuxième mécanisme, consécutif au flux de CO_2 issu de la minéralisation primaire, permet une migration en profondeur du carbone biologique qui reprécipite sous forme minérale (Jacquin *et al.* 1979). Cette gangue de carbonate de calcium recouvre certains composés humiques hérités ou humifiés ; on assiste donc à une momification de ces formes d'humines avec présence d'un taux d'humus élevé ; en sols cultivés, le flux intense de la minéralisation primaire

modifie ces fortes réserves carbonées qui plafonnent aux environs de 2 à 3 %.

Dans ces types d'humus proches des *mull* carbonatés, une intensification élevée en cultures céréalières peut entraîner des risques écologiques ; en effet, suivant les conditions climatiques, une réorganisation intense des fertilisants minéraux azotés peut être suivie d'une minéralisation secondaire en dehors de phases d'absorption par les végétaux.

En conclusion, nous pouvons affirmer que plus l'agriculture s'intensifie, notamment par des productions végétales à forts rendements mais à cycles végétatifs courts, plus il faudra réviser les notions actuelles quant à l'optimisation du bilan humique sous certaines conditions agro-pédo-climatiques. En effet, une teneur définie en carbone sera difficile à maintenir, voire à redresser sur le plan économique. L'apport de fumier traditionnel n'est envisageable que lorsque les contraintes naturelles où les habitudes socio-culturelles maintiennent un agrosystème de polyculture-élevage. L'utilisation de rotations comportant des plantes intervenant non seulement sur la tendance humique à moyen terme mais pouvant remédier ponctuellement à des contraintes agronomiques (battance) ou à des risques écologiques (pollution par les nitrates) devra être envisagée.

Dans tous les cas, l'agronome devra connaître les cinétiques spécifiques de l'évolution des différentes formes de matière organique liées aux divers pédoclimats afin d'aborder la notion de bilan humique à la fois sur le plan quantitatif et qualitatif.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CARBALLAS T., CARBALLAS M., JACQUIN F., 1978. — *Anales de Edafologia*. Tomo XXXVII, n° 1-2, 205-212.
DUCHAUFOUR Ph., 1970. — Précis de pédologie, Ed. Masson, Paris.
DUCHAUFOUR Ph., 1983. — Pédologie, Tome I : Pédogenèse et classification. Ph. Duchaufour et B. Souchier, Ed. Masson, Paris.
FLAIG W., 1980. — Science du Sol, 2, 39-72.
GALLALI T., 1980. — Transfert sols-matière organique en zones arides méditerranéennes. Thèse Doctorat d'État, INPL Nancy.
HENIN S., TURC L., 1949. — C.R. Acad. Agric., 35, 41-43.
JACQUIN F., 1963. — Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques. Thèse Doctorat d'État, Nancy.
JACQUIN F., CARBALLAS T., 1979. — Symp. Humus et Planta, PRAGUE, 1, 173-179.
JACQUIN F., HAIDOUTI C., MULLER J.C., 1980. — Bull. AFES n° 1, 27-36.
JACQUIN F., LE TACON F., 1970. — Bull. ENSAIA, 12 (1-11), 12-20.
JACQUIN F., MALLOUHI N., SCHIAVON M., 1979. — C.R. Acad. Sc. t. 288, série D. 1279-1282.
KONONOVA M.M., 1958. — *Veb. deutscher Verlag der wissenschaften*, Berlin.
MALHOUI N., 1982. — Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur l'évolution de la matière organique. Thèse Doctorat d'État, INPL Nancy.
NUSSBAUMER E., GUCKERT A., JACQUIN F., 1970. — C.R. Acad. Sc. 270, 3235-3238.
SCHNITZER M., KHAN S.U., 1978. — *Soil Organic Matter, Elsevier Scientific Company*, Amsterdam, The Netherlands.

M. Duchaufour. — Les termes, moder et mor, utilisés par F. Jacquin, ont été définis par les forestiers danois pour désigner des humus forestiers, cela sur des bases morphologiques (horizons et structures). Or, après mise en culture cette morphologie est modifiée et uniformisée de sorte qu'il n'est plus possible de distinguer les humus forestiers originels. En outre les fractions les plus « labiles » se minéralisent rapidement. Cependant les fractions les plus stables conservent après la mise en culture leur caractère originel, ce qui justifie, dans une certaine mesure l'option prise par F. Jacquin de conserver l'appellation de l'humus d'origine : par exemple un humus agricole, sur sable acide, contiendra surtout des composés résiduels, alors qu'un humus dérivant d'un mull sur limon sera caractérisé par la dominance de composés de néoformation.

M. Jacquin. — J'ai été sensible aux observations très judicieuses de mes lecteurs. Certes, plus l'agriculture s'intensifie, plus l'importance des cinétiques des composés les plus labiles revêtira une priorité afin d'optimiser qualitativement et quantitativement le bilan du carbone dans les sols cultivés sous climats tempérés. Néanmoins, le rôle de l'agronome correspond à gérer le milieu naturel en tenant compte de critères scientifiques fondamentaux qui, dans ce cas précis, correspondent bien à l'étude des mécanismes et des rythmes de l'humification et de la minéralisation.

M. Keilling. — Cette communication renforce à mon avis un concept sur lequel on n'insiste pas suffisamment : le travail du sol n'est pas seulement une opération physique, mais il s'agit d'une véritable industrie de fermentation qui dépend de facteurs physiques divers et qui met en activité la population de la biomasse. L'exemple de l'évolution du soufre dans les sols cultivés est à cet égard très instructif.

Par ailleurs j'ai noté l'omission par notre confrère Jacquin des aspects enzymatiques du problème de l'humus, il y a pourtant, de ce point de vue, nombre de développements possibles.

M. Jacquin. — N'étant pas spécialiste d'enzymologie, je n'ai pas abordé ce problème ; il n'en demeure pas moins vrai que les sols soumis à des agro-systèmes intensifs des potentialités de plus en plus régies par des mécanismes biochimiques complexes intervenant sur le turn-over de la biomasse microbienne.

Chaque compartiment de cette biomasse fonctionnera comme une unité biotechnologique avec ses spécificités mais aussi ses interdépendances avec des paramètres variables et aléatoires tels que le prédoclimat et l'activité physiologique des plantes cultivées.